UN MODELO PARA ENVIAR, RECIBIR Y DISTRIBUIR AYUDA EN ESPECIE DESPUÉS DE HABER OCURRIDO UN DESASTRE NATURAL

José Fernando Camacho Vallejo
Edna Lizet González Rodríguez
UANL-FCFM
Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ciencias Físico Matemáticas
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México

Resumen:
En este trabajo se propone un modelo de programación binivel en logística humanitaria para optimizar el envío, recepción y distribución de la ayuda en especie en el caso en que haya ocurrido de desastre natural con consecuencias catastróficas. Cuando ocurre un sismo o un tsunami en un país, y si resulta seriamente afectado, habrá organismos sin fines de lucro y algunos otros países que inmediatamente tratarán de enviar productos para ayudar; sean alimentos, agua, medicamentos, entre otros. Es claro que quienes brinden ayuda buscarán minimizar los costos de realizar los envíos a alguna de las zonas de acopio; dichos envíos pueden ser por medio aéreo, terrestre o marítimo. En cambio, el país afectado buscará distribuir la ayuda de forma eficiente, esto es, enviando los productos solicitados a las zonas afectadas en el menor tiempo posible. Este problema es importante debido a que últimamente se han presentado desastres naturales de magnitudes grandes. Además, se propone una reformulación del modelo reduciéndolo a un problema de optimización no lineal de un solo nivel.

Palabras claves: programación binivel, logística humanitaria, equilibrio de Stackelberg

Introducción

En los últimos años se han presentado varios desastres naturales con consecuencias catastróficas para la población afectada. Entre ellos podemos mencionar los terremotos en Haití y en Chile en 2010, donde dichos países se vieron sumamente afectados y requirieron de la ayuda oportuna de todo el mundo. Otro ejemplo es el tsunami ocurrido en la costa de Japón en 2011, donde gran parte de la región afectada fue devastada. Estos hechos propiciaron que muchos países y organismos internacionales enviaran ayuda que consistía desde dinero, voluntarios y productos.

Los productos enviados más comunes son medicamentos, comida enlatada, agua potable, pañales, entre otros. Es evidente la urgente necesidad de recibir esos productos para poder distribuirlos en las regiones afectadas y evitar que se incrementen las muertes por hambruna o por enfermedades. Es por esto que la eficiente distribución de dichos artículos es necesaria, este hecho ya ha sido notado por otros autores, por ejemplo, en [1] enlistan algunos trabajos realizados sobre distribución de ayuda y su transportación casual. Además, es evidente la importancia de la rapidez y eficiencia que tiene que tener la cadena de suministro involucrada en estas situaciones, en [2] y [3] se presentan trabajos enfatizando este hecho.

La rama que se encarga de estudiar estos problemas es la **Logística Humanitaria**, la cual se enfoca en modelar problemas relacionados con el almacenamiento y distribución de productos requeridos por la población afectada debido a la ocurrencia de un desastre natural; o bien, un desastre provocado por el hombre. Estas situaciones las podemos analizar de dos formas, proactivas y reactivas. Proactivas para estudiar el problema de interés antes de que ocurra un desastre y reactivas para el caso cuando ya ocurrió y hay que decidir las acciones que deberán realizarse. En [4] presentan una extensa revisión de literatura sobre los problemas relacionados con Logística Humanitaria; además hacen una división de las etapas relacionadas con estos desastres: la etapa de **Mitigación** donde se analizan las acciones que se deben tomar para disminuir la probabilidad de ocurrencia de un desastre o bien, reducir el impacto en caso de que ocurra. La etapa de **Preparación** se refiere a planear las actividades a seguir en caso de un desastre. La etapa de **Respuesta** es cuando ya ocurrió un desastre y se deben realizar acciones para evitar que se incrementen las consecuencias desastrosas. Por último, la etapa de **Recuperación** es aquella en que se llevan a cabo las acciones que devuelvan a la normalidad a la zona afectada, ya sea a corto o mediano plazo.

Este trabajo está enfocado específicamente en analizar una situación en particular relacionada con la etapa de **Respuesta**; dicho problema es el de distribuir eficientemente la ayuda hacia las zonas afectadas. Es natural pensar que las demandas de las zonas afectadas varían constantemente e inclusive hay nodos y aristas de la red que desaparecen. En [5] propusieron un algoritmo de tres etapas: primero agrupaban las zonas afectadas con base en las características de la demanda y la prioridad, después identificaban el centro de gravedad de cada agrupamiento para hacer la entrega de la ayuda y por último, el ruteo de vehículos para realizar la distribución. Como continuación del trabajo recién descrito, en [6] se agregó un caso de estudio de un terremoto en Taiwán.

También en el 2012 en [7] consideran el problema donde existen centros de acopio que se encargan de recibir la ayudar externa y plantean una función multi-objetivo donde intentan minimizar el costo de operar un centro de acopio, minimizar el costo de distribución y maximizar la demanda cubierta. Los autores reformulan el problema como un problema de programación lineal mixto-entero, lo resuelven por etapas usando una heurística y comparan los resultados con los obtenidos mediante el algoritmo NSGA-II.

Algo que también es de interés es proveer sistemas que traten de brindar ayuda en la toma de decisiones de una situación de emergencia. Bajo este enfoque, en [8] desarrollaron un modelo de programación lineal en una cadena de suministro para una situación de emergencia. En esos modelos ya se tenía la demanda fija para cada zona afectada y el centro de acopio que iba a abastecer a dicha zona. El problema se reducía a determinar el número de camiones asignados para cada ruta, considerando que no había limitantes en el número de camiones disponibles.

También en [9] proveen de dos enfoques para tomar decisiones eficientes relacionadas al acopio de la ayuda en especie y a su distribución. Uno de los modelos era un modelo de asignación en el que se minimiza el tiempo de terminar de ayudar en una zona afectada la vez; en el otro modelo de colaboración distribuida se podía atender varias áreas afectadas al mismo tiempo.

En los modelos anteriores se considera una demanda conocida, ya sea obtenida mediante un pronóstico o de alguna otra manera. Pero como no sabemos la magnitud del desastre o el tiempo en que ocurre es razonable considerar la demanda de la zona afectada como estocástica.

También encontramos el trabajo [10] donde se busca tener un inventario de productos requeridos para después distribuirlos. Ellos proponen un algoritmo heurístico basado en el método L-shaped, el cual es capaz de resolver problemas de gran escala y lo validan mediante un caso de estudio de la ocurrencia de un huracán en el área de la costa del Golfo de los Estados Unidos.

En [11] en el 2012 proponen un modelo jerárquico donde primero se busca restablecer los caminos dañados por el desastre para después distribuir de mejor manera la ayuda solicitada. Es importante señalar que los autores hacen énfasis en la importancia de coordinar la distribución de ayuda con el restablecimiento de los caminos. Para mostrar la validez de su modelo analizan un caso de estudio basado en el terremoto de Haití. A pesar de que estos modelos mencionan que consideran jerarquías, ninguno de ellos pertenece al área de programación multi-nivel.

En cambio, el modelo que nosotros proponemos en el presente trabajo es programación bi-nivel, la cual es un caso particular de programación multi-nivel en el cual solo se consideran dos niveles de decisión. El problema considerado está enfocado en la eficiente distribución de la ayuda en especie recibida en los centros de acopio. Dicha ayuda deberá distribuirse a las zonas afectadas de forma rápida y eficaz pero considerando que los países u organismos internacionales tratan de ayudar de tal forma que les sea menos costoso el envío.

Muchas situaciones reales involucran tomadores de decisiones en dos niveles los cuales están relacionados por una jerarquía prestablecida. El hecho de que exista esta jerarquía implica que el problema sea considerado dentro de la categoría de optimización multi-objetivo. El área que engloba a ese tipo de problemas se llama Programación Bi-nivel.

Después de una extensa revisión de literatura nos dimos cuenta que en el área de logística humanitaria hay muy pocos trabajos modelados como problemas de programación bi-nivel. Por ejemplo, desde el punto de vista de analizar desastres ocasionados por el hombre, en [12] consideran el problema de la amenaza terrorista como un problema bi-nivel. En el nivel superior el terrorista busca maximizar el daño ocasionado atacando al mínimo número de líneas de un sistema de energía mientras que en el nivel inferior se intenta minimizar las cargas derramadas ocasionadas por el ataque. El problema bi-nivel propuesto resulta ser no-lineal mixto entero y lo reducen a un problema lineal mixto entero de un solo nivel utilizando las condiciones de optimalidad de Karush-Khun-Tucker y algunas restricciones válidas para evitar la no-linealidad. Recientemente en [13] analizan un juego líder-seguidor donde se pretende proteger instalaciones para prevenir la re-asignación de los clientes en caso de un ataque. El líder busca minimizar la suma de los costos incurridos para instalar, proteger y utilizar esa instalación. El seguidor busca destruir las instalaciones desprotegidas para afectar la capacidad de abastecimiento de las plantas no restantes. Para resolver el problema proponen un algoritmo basado en búsqueda tabú. También, en [14] formulan el problema de protección de instalaciones como un programa bi-nivel lineal mixto entero, el cual analiza el tiempo de recuperación de un sistema después de un incidente considerando que pueden ocurrir varios incidentes más a través del tiempo. Ninguno de estos tres trabajos analiza una situación perteneciente a la etapa de Respuesta.

Un trabajo que pertenece a la etapa de Respuesta igual que el problema que estamos analizando es el [15] en el que consideran el problema bi-nivel en donde ocurrió un terremoto que afectó la red de carreteras de la zona, entonces el líder trata de maximizar el flujo de vehículos que entran a la zona afectada para proveer ayuda, mientras que los seguidores son los usuarios que buscan viajar por la ruta no afectada que minimice su tiempo de viaje. Esta situación genera tráfico, lo cual impacta en las labores de ayuda y recuperación, por lo que un organismo gubernamental debe de regular el uso de los caminos existentes.

Nuestro problema de interés podría verse como el siguiente problema bi-nivel: cuando ocurre una catástrofe devastadora en alguna zona del mundo, muchos países y organismos internacionales envían ayuda al país afectado. El nivel superior, el país afectado (líder) debe elegir el medio de transporte y la forma de distribuir rápidamente los productos de ayuda. Se considera que existen varios puntos (centros de acopio) a donde puede llegar la ayuda y los lugares afectados que requieren ayuda demandarán algunos productos de manera prioritaria. Por último, en el nivel inferior, se asume que los países u organismos internacionales (seguidores) que envían ayuda deciden libremente a cual centro de acopio enviarlo de tal forma que se minimice el costo del envío. Este problema es innovador porque se considera por vez primera a la parte que brinda ayuda no solamente al país afectado. No es descabellado considerar que quienes envían ayuda están interesados en reducir los costos de sus acciones, lo que nos motiva a considerar el nivel inferior del problema propuesto.

La organización del trabajo es la siguiente: la segunda sección presenta la descripción del modelo. La tercera sección describe la reformulación matemática del modelo. La cuarta sección muestra el trabajo futuro y por último las referencias.

Modelo matemático de programación bi-nivel

El modelo puede describirse como sigue: sean $i \in I$ los países u organismos internacionales que ayuden al país afectado; $j \in J$ son lugares específicos en donde se puede recibir la ayuda en especie dentro del país afectado (centros de acopio); $k \in K$ son los lugares con necesidad urgente para recibir ayuda; $l \in L$ denota un producto específico (agua potable, medicamentos, comida enlatada, ropa, papel, entre otros); y por último, sea $m \in M$ el medio de transporte utilizado para enviar o distribuir los productos (terrestre, aéreo o marítimo).

Definamos t^1_{ijlm} como el tiempo que tarda en llegar un cargamento del producto l por el medio de transporte m desde el organismo de ayuda i hacia el centro de acopio j; de manera similar sea t^2_{jklm} el tiempo que tarda en distribuirse un cargamento del producto l por el medio de transporte m desde el centro de acopio j hacia la zona afectada k. También se tendrá un volumen v_l que ocupa un cargamento del producto l y en cada centro de acopio j se cuenta con una capacidad de espacio limitada V_j. En cada zona afectada k se cuenta con una demanda conocida D_{kl} de cada artículo l, así como en cada país u organismo de ayuda i se tiene un máximo de ayuda disponible H_{il} de cada producto l. Por último, sea c_{ijm} el costo de enviar un cargamento por el medio de transporte m desde el organismo de ayuda i hacia el centro de acopio j.

Las variables de decisión para nuestro problema son:

x_{ijlm}= cantidad de cargamentos del producto l enviados por el medio de transporte m desde el país u organismo de ayuda i hacia el centro de acopio j.

y_{jklm}= cantidad de cargamentos del producto l distribuida por el medio de transporte m desde el centro de acopio j hacia la zona afectada k.

Entonces tenemos que el modelo resultante es como sigue:

$$\min_{y_{jklm}} \sum_{i\in I} \sum_{j\in J} \sum_{l\in L} \sum_{m\in M} t^1_{ijlm} x_{ijlm} + \sum_{j\in J} \sum_{k\in K} \sum_{l\in L} \sum_{m\in M} t^2_{jklm} y_{jklm} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{k\in K} \sum_{l\in L} \sum_{m\in M} v_l y_{jklm} \leq V_j\,, \quad \forall j \in J \quad (2)$$

$$\sum_{j\in J} \sum_{m\in M} y_{jklm} \geq D_{kl}\,, \quad \forall k \in K, l \in L \quad (3)$$

$$y_{jklm} \geq 0\,, \quad \forall j \in J, k \in K, l \in L, m \in M \quad (4)$$

$$x_{ijlm} \text{ Argmin}_{\bar{x}_{ijlm}} \sum_{i\in I} \sum_{j\in J} \sum_{l\in L} \sum_{m\in M} c_{ijm} \bar{x}_{ijlm} \quad (5)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i\in I} \sum_{m\in M} \bar{x}_{ijlm} = \sum_{k\in K} \sum_{m\in M} y_{jklm}\,, \ \forall j \in J,\ l \in L \quad (6)$$

$$\sum_{j\in J} \sum_{m\in M} \bar{x}_{ijlm} \leq H_{il}\,, \quad \forall i \in I, l \in L \quad (7)$$

$$\bar{x}_{ijlm} \geq 0\,, \quad \forall i \in I, j \in J, l \in L, m \in M \quad (8)$$

El problema binivel está definido por (1)-(8). En (1) se presenta la función objetivo del nivel superior y se aprecia que el líder quiere minimizar el tiempo total de respuesta para distribuir la ayuda, esto es, el tiempo necesitado para enviar desde el organismo de ayuda i hacia el centro de acopio j y de ahí hacia la zona afectada k. En (2) se tiene una restricción de espacio disponible en cada centro de acopio j; en (3) se tiene que satisfacer la demanda necesitada para cada producto l en cada zona afectada k y la restricción (4) restringe a que el número de embarques de cada producto tiene que ser no negativo.

La restricción (5) es la que convierte este problema en uno binivel. Esta restricción implica que las variables x_{ijlm} deben ser la solución óptima del problema (5)-(8). A (5) se le conoce como la función objetivo del nivel inferior e indica que se quiere minimizar el costo de enviar la ayuda de parte del organismo de ayuda i hacia el centro de acopio j. La ecuación (6) dice que se debe de enviar solamente lo requerido para cada centro de acopio j de cada producto l. La expresión (7) asegura que un país u organismo de ayuda i no puede enviar más de una cantidad disponible del producto l y (8) señala la no negatividad para los embarques de cada producto desde el organismo de ayuda i hacia el centro de acopio j.

Durante este trabajo asumimos que se conocen tanto las zonas afectadas, la ubicación de los centros de acopio y los organismos que están disponibles para ayudar; así como un organismo central que coordina a dichos países u organismos de ayuda para no enviar ayuda innecesaria. Además, consideramos que no hay restricciones en cuanto al número de vehículos disponibles por cualquier medio para la distribución de la ayuda.

El esquema del modelo es: El líder (país afectado) decide cómo distribuir la ayuda desde los centros de acopio hacia los lugares necesitados, esto es, fija las y_{jklm}. Debido a esto, se conjunta una demanda conocida de cada producto l que el país afectado está solicitando en cada centro de acopio j. Basado en esa demanda, una organización humanitaria trata de coordinar a los demás países u organismos de ayuda que quieran participar enviando los embarques de ayuda de tal forma que minimicen el costo de envío y se cumplan con las condiciones de demanda. Esto es, se deciden las x_{ijlm}. Ahora con las y_{jklm} y x_{ijlm} el líder evalúa su función objetivo para minimizar el tiempo de distribución que requiere para enviar a las zonas afectadas k.

El diagrama se presenta en la **Figura 1.**

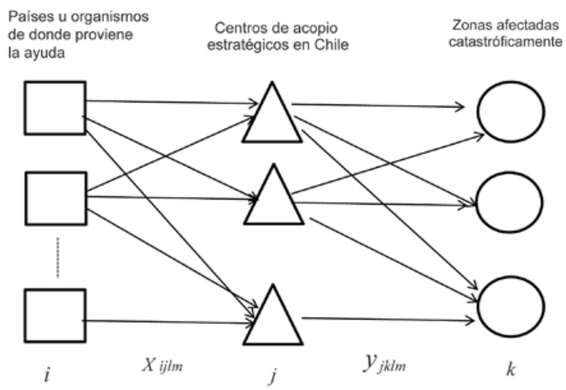

Figura 1. Diagrama del problema

Reformulación del modelo

En esta sección reformularemos el problema binivel en un problema de programación no lineal de un solo nivel. Es fácil verse que si en el problema binivel (1)-(8) se fijan las variables y_{jklm}, entonces el problema del nivel inferior (5)-(8) se convierte simplemente en un problema de transporte. Entonces, este problema del nivel inferior puede ser remplazado por las condiciones de optimalidad del problema primal y dual. Definamos a α_{jl} , $\forall j\in J$, $l\in L$ y a β_{il} , $\forall i\in I, l\in L$ como las variables duales correspondientes a las restricciones (6) y (7) respectivamente.

El problema dual asociado al nivel inferior está formado por:

$$\max_{\alpha_{jl},\beta_{il}} \sum_{j\in J}\sum_{l\in L}\Big(\sum_{k\in K}\sum_{m\in M} y_{jklm}\Big)\alpha_{jl} + \sum_{i\in I}\sum_{l\in L} H_{il}\beta_{il} \qquad (9)$$

Sujeto a:

$$\alpha_{jl} + \beta_{il} \le c_{ijm}\,, \quad \forall i\in I, j\in J, l\in L, m\in M \qquad (10)$$

$$\alpha_{jl} \text{ urs}\,, \quad \forall j\in J, l\in L \qquad (11)$$

$$\beta_{il} \le 0\,, \quad \forall i\in I, j\in J, l\in L \qquad (12)$$

Siguiendo con la teoría existente sobre reducciones de problema de programación binivel procedemos a utilizar la igualdad de las funciones objetivo de ambos niveles para tener el problema de programación no lineal de un solo nivel:

$$\min_{y_{jklm},x_{ijlm},\alpha_{jl},\beta_{il}} \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{l\in L}\sum_{m\in M} t^1_{ijlm}x_{ijlm} + \sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{l\in L}\sum_{m\in M} t^2_{jklm}y_{jklm} \qquad (13)$$

<u>Sujeto a:</u>

$$\sum_{k\in K}\sum_{l\in L}\sum_{m\in M} v_l y_{jklm} \le V_j\,, \quad \forall j\in J \qquad (14)$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{m\in M} y_{jklm} \ge D_{kl}\,, \quad \forall k\in K, l\in L \qquad (15)$$

$$\sum_{i\in I}\sum_{m\in M} x_{ijlm} = \sum_{k\in K}\sum_{m\in M} y_{jklm}\,, \quad \forall j\in J, l\in L \qquad (16)$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{m\in M} x_{ijlm} \le H_{il}\,, \quad \forall i\in I, l\in L \qquad (17)$$

$$\alpha_{jl} + \beta_{il} \le c_{ijm}\,, \quad \forall i\in I, j\in J, l\in L, m\in M \qquad (18)$$

$$\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{l\in L}\sum_{m\in M} c_{ijm}x_{ijlm} = \sum_{j\in J}\sum_{l\in L}\Big(\sum_{k\in K}\sum_{m\in M} y_{jklm}\Big)\alpha_{jl} + \sum_{i\in I}\sum_{l\in L} H_{il}\beta_{il} \qquad (19)$$

$$y_{jklm} \ge 0\,, \quad \forall j\in J, k\in K, l\in L, m\in M \qquad (20)$$

$$x_{ijlm} \ge 0\,, \quad \forall i\in I, j\in J, l\in L, m\in M \qquad (21)$$

$$\beta_{il} \le 0\,, \quad \forall i\in I, j\in J, l\in L \qquad (22)$$

La restricción (13) es la función objetivo del problema no lineal de un solo nivel. Las restricciones (14)-(17), (20) y (21) nos brindan la factibilidad primal. Las restricciones (18) y (22) nos aseguran la factibilidad dual. Por último, la restricción (19) nos garantiza que se obtenga el óptimo del problema del nivel inferior; sin embargo, también nos hace perder la linealidad del modelo.

Otra forma es quitar la ecuación (19) y considerar las restricciones de holgura complementaria

$$(c_{ijm} - \alpha_{jl} - \beta_{il}) = 0\ ,\ \forall i \in I, j \in J, l \in L, m \in M \qquad (23)$$

$$I_{il} - \sum_{j\in J} \sum_{m\in M} \bar{x}_{ijlm}) = 0\ ,\ \forall i \in I, l \in L \qquad (24)$$

Pero evidentemente podemos apreciar que estas ecuaciones de complementariedad también nos hacen perder linealidad.

Trabajo Futuro

Esta investigación está actualmente en proceso y se están consiguiendo los datos reales del terremoto ocurrido en Chile en 2010 para llevar a cabo un caso de estudio sobre ese acontecimiento. Además al modelo se le pueden agregar las restricciones de balanceo de la ayuda recibida en los centros de acopio para que no se saturen mientras que otros tengan mucho espacio disponible.

También podemos identificar que este problema cae dentro de la categoría de los modelos de programación binivel con el parámetro en el lado derecho únicamente. Para este tipo de problema ya se han desarrollado algunos algoritmos especiales para resolverlos por lo que analizaron su implementación para solucionar nuestras instancias.

Otra posible extensión de este trabajo es que podemos considerar la eliminación de arcos de la red y después su incorporación a la misma. Esto, simulando la destrucción de algún camino y después su restablecimiento para la utilización.

Referencias

[1] Caunhye, A.M., Nie, X., and Pokharel, S., "Optimization Models in Emergency Logistics: A Literature Review". Socio-Economic Planning Science. Vol. 46, pp. 4-13. 2012.

[2] Wang, Q. and Rong, L. "Agile Knowledge Supply Chain for Emergency Decision-Making Support". Proceedings of the 7th International Conference on Computational Science, Part IV. pp. 178-185. 2007.

[3] Ji, G. and Zhu, C., "A Study on Emergency Supply Chain and Risk Based on Urgent Relief Service in Disasters". Systems Engineering Procedia. Vol. 5, pp. 313-325. 2012.

[4] Altay, N. and Green, W.G. "Interfaces with other Disciplines OR/MS Research in Disaster Operations Management". European Journal of Operational Research. Vol. 175, pp. 475-493. 2006.

[5] Sheu, J.B. and Chen, Y.H. "A Novel Model for Quick Response to Disaster Relief Distribution". Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. Vol. 5, pp. 2454-2462. 2005.

[6] Sheu, J.B. "An Emergency Logistics Distribution Approach for Quick Response to Urgent Relief Demand in Disasters". Transportation Research Part E. Vol. 43, pp.687-709. 2007.

[7] Rath, S. and Gutjahr, W.J. "A Math-Heuristic for the Warehouse Location-Routing Problem in Disaster Relief". Computers & Operations Research. In Press.

[8] Rathi, A.K., Church, R.L. and Solanski, R.S. "Allocating Resources to Support a Multicommodity Flow with Time Windows". Logistics and Transportation Review. Vol. 28, pp. 167-188. 1993.

[9] Wex, F., Schryen, G. and Neumann, D. "Intelligent Decision Support for Centralized Coordination during Emergency Response". Proceedings of the 8th International ISCRAM Conference. 2011.

[10] Rawls, C.G. and Turnquist, M.A. "Pre-positioning of Emergency Supplies for Disaster Response". Transportations Research Part B. Vol. 44, pp. 521-534. 2010.

[11] Liberatore, F., Ortuño, M.T., Tirado, G. and Scaparra, M.P. "A Hierarchical Compromise Model for the Joint Optimization of Recovery Operations and Distribution of Emergency Goods in Humanitarian Logistics". Computers & Operations Research. In Press. 2012.

[12] Arroyo, J.M. and Galiana, F.D. "One the Solution of the Bi-level Programming Formulation of the Terrorist Threat Problem". IEEE Transactions on Power System. Vol. 20, No. 2. May 2005.

[13] Aksen, D. and Aras, N. "A Bi-level Fixed Charge Location Model for Facilities under Imminent Attack". Computers & Operations Research. Vol. 39, pp. 1364-1381. 2012.

[14] Losada, Ch., Scaparra, M.P. and O'Hanley, J.R.. "Optimizing System Resilience: A Facility Protection Model with Recovery Time". European Journal of Operational Research. Vol. 217, pp. 519-530. 2012.

[15] Feng, C.M. and Wen, C.C. "A Bi-level Programming Model for Allocating Private and Emergency Vehicle Flows in Seismic Disaster Areas". Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. Vol. 5, pp. 1408-1423. 2005.

Datos del Autor:

José Fernando Camacho Vallejo

El Dr. Camacho tiene Licenciatura en Matemáticas por la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Maestría en Ciencias en Ingeniería con especialidad en Ingeniería Industrial por Arizona State University y Doctorado en Ciencias de la Ingeniería con especialidad en Ingeniería Industrial otorgado por el ITESM campus Monterrey. Actualmente se encuentra laborando como profesor-investigador exclusivo y de tiempo completo en CICFIM y es coordinador del Posgrado en Ciencias con Orientación en Matemáticas de la FCFM en la UANL. Las líneas de investigación de interés son resolución de problemas de investigación de operaciones, en particular sobre teoría y aplicaciones de programación binivel, diseño de métodos numéricos y técnicas heurísticas para resolver problemas de programación binivel.

Dirección del autor: Ciudad Universitaria, S/N, C.P. 66451, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

Email: jose.camachovl@uanl.edu.mx

Edna Lizet González Rodríguez

Tiene Licenciatura en Ciencias Computacionales por la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Actualmente se encuentra estudiando la Maestría en ciencias con orientación en matemáticas en la Facultad de Físico Matemáticas de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Dirección del autor: Ciudad Universitaria, S/N, C.P. 66451, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

Email: edna_lizet@hotmail.com